

ANALISIS PENURUNAN TANAH MENGGUNAKAN METODE *VACUUM CONSOLIDATION* DENGAN VARIASI JARAK PEMASANGAN PVD

Annur Dhuha Ahsan¹, Gusneli Yanti², Shanti Wahyuni Megasari³

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Lancang Kuning, Jl. Yos Sudarso Km. 08 Rumbai, Pekanbaru, 28265
Email korespondensi : annurdhuhaahsan56@gmail.com

²Prodi Teknik Sipil, Universitas Lancang Kuning, Jl. Yos Sudarso Km. 08 Rumbai, Pekanbaru, 28265
Email : gusneli@unilak.ac.id

³Prodi Teknik Sipil, Universitas Lancang Kuning, Jl. Yos Sudarso Km. 08 Rumbai, Pekanbaru, 28265
Email : shanti@unilak.ac.id

ABSTRAK

Hasil investigasi tanah pada lokasi perpanjangan *runway* diperoleh bahwa kondisi tanah relatif lunak dan berjenis tanah lempung yang ditandai dengan nilai $N-SPT \leq 10$ pada kedalaman 8,7 m. Pembangunan yang dilaksanakan di atas tanah lunak akan berakibat pada penurunan tanah dasar yang sangat besar dalam periode waktu yang lama, sehingga tanah dasar tidak kuat memikul beban di atasnya. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui waktu dan besarnya penurunan yang terjadi pada tanah untuk dapat mencapai konsolidasi 90% menggunakan metode *vacuum consolidation* dengan variasi jarak pemasangan PVD. Perbaikan tanah menggunakan metode *vacuum consolidation* dengan melakukan variasi jarak pemasangan PVD sebesar 0,5 m, 0,75 m, dan 1,0 m. Pada penelitian ini dilakukan pola segitiga dan tanpa *smear zone*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan besar dan waktu penurunan tanah saat dilakukan perbaikan tanah dengan metode *vacuum consolidation*. Nilai yang tertinggi diperoleh dengan jarak pemasangan PVD sebesar 0,50 m yaitu menghasilkan waktu untuk mencapai derajat konsolidasi 90% yang lebih cepat selama 15 hari dan besar penurunan yang terjadi adalah sebesar 1,737 m.

Kata kunci: Konsolidasi, Penurunan Tanah, PVD, *Vacuum Consolidation*

ABSTRACT

The results of the soil investigation at the runway extension site obtained that the condition of the land is relatively soft and clay type characterized by the value of $N-SPT \leq 10$ at a depth of 8,7 m. Development carried out on soft soil will result in a very large subgrade subsidence over a long period of time, so that the subgrade is not strong enough to bear the load on it. The purpose of this study was to analyze the magnitude of the settlement that occurred in the soil and the time required for the soil to reach 90% consolidation using the vacuum consolidation method with variations in the distance of PVD installation. Soil improvement using vacuum consolidation method by varying the distance of PVD installation by 0,5 m, 0,75 m, and 1,0 m. In this research, triangular patterns were conducted and without smear zone. The results showed that there was a large increase and time of land subsidence when soil improvement was carried out using the vacuum consolidation method. The highest value was obtained with a PVD installation distance of 0,50 m, which resulted in a time to achieve a 90% faster degree of consolidation for 15 days and the amount of settlement that occurred was 1,737 m.

Keywords : Consolidation, Settlement, PVD, *Vacuum Consolidation*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan peningkatan jumlah penduduk yang menuntut pembangunan infrastruktur maka perlu untuk dilakukan

sebuah pembangunan. Area yang layak untuk dilakukan sebuah pembangunan semakin terbatas, oleh sebab itu pembangunan dilakukan di atas tanah yang

perlu dilakukan perbaikan tanah seperti tanah lempung lunak dan tanah gambut. Berdasarkan hasil investigasi tanah yang telah dilakukan, diperoleh hasil kondisi tanah pada lokasi perpanjangan *runway* relatif lunak dan berjenis tanah lempung yang memiliki nilai N-SPT ≤ 10 dengan kedalaman 8,7 m. Penurunan tanah dasar yang sangat besar dalam periode waktu yang lama merupakan permasalahan yang dihadapi jika membangun infrastruktur di atas tanah lunak dalam kondisi jenuh baik itu tanah lempung maupun gambut [1]. Sehingga dikhawatirkan tanah dasar tidak mampu memikul beban di atasnya. Beberapa macam metode perbaikan tanah dengan cara melakukan konsolidasi adalah metode *preloading*, metode *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain* (PVD), dan metode *vacuum consolidation* [11].

Metode *vacuum consolidation* adalah metode yang bertujuan untuk mengurangi tekanan air pori di dalam tanah dengan menggunakan teknik yang menerapkan penghisapan vakum yang terisolasi massal kedalamnya, sehingga dengan cara tersebut tegangan efektif dapat meningkat tanpa mengubah tegangan total [3]. Dengan menggunakan metode *vacuum consolidation* tanah akan mencapai penurunan yang lebih besar dengan waktu konsolidasi yang lebih cepat, sehingga tanah akan menjadi kuat dan stabil dalam menerima beban yang diterimanya [13]. Dengan menggunakan metode *vacuum consolidation* tidak memerlukan tanah timbun yang tinggi, sehingga tidak mengganggu jarak pandang penerbangan saat dilakukan perbaikan tanah.

Penelitian yang dilakukan oleh [6], pada perbaikan tanah dengan metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) diperoleh kenaikan nilai daya dukung tanah dan lama waktu konsolidasi untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan jarak pemasangan PVD (s) = 1,0 m menjadi variasi yang efektif, karena waktu konsolidasi yang paling singkat yakni 1,03 tahun dan *settlement* yang terjadi sebesar 1,42 m.

Pada penelitian [1], dilaksanakan perbaikan tanah dengan metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dengan jarak pemasangan 0,5 m dengan pola segitiga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan tanah sebesar 3,8 m dengan waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90% adalah selama kurang lebih 2 bulan.

Berdasarkan dari penelitian sebelumnya, diketahui bahwa dengan memperkecil jarak pemasangan hingga jarak 0,5 m pada perbaikan tanah akan memperoleh kenaikan nilai daya dukung tanah dan mempercepat waktu konsolidasi untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan menggunakan metode *vacuum consolidation*.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis besarnya penurunan yang terjadi pada tanah dan waktu yang diperlukan agar tanah dapat mencapai konsolidasi 90% menggunakan metode *vacuum consolidation* dengan variasi jarak pemasangan PVD pada proyek perpanjangan *runway* Sultan Thaha Syaifuddin (STA 2+422 – STA 2+662).

Tanah lempung merupakan agregat partikel-partikel berukuran mikroskopik dan submikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusun batuan, dan bersifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai luas. Pada umumnya tanah lempung merupakan material tanah dasar yang buruk, karena kekuatan geser yang dimiliki tanah tersebut sangat rendah sehingga beberapa masalah seperti daya dukung yang rendah dan sifat kembang susut yang besar selalu dihadapi jika ingin melakukan pembangunan konstruksi di atas lapisan tanah ini [4].

Penurunan tanah (*settlement*) dapat terjadi karena suatu permukaan tanah terbebani oleh struktur yang terletak di atas tanah tersebut. Penurunan tanah diakibatkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, serta keluarnya air dan udara dari dalam pori-pori tanah. Pada tanah berbutir kasar seperti pasir, memiliki pori tanah yang

cukup besar sehingga penurunan segera dan penurunan konsolidasi dapat terjadi secara bersama, namun pada tanah berbutir halus, waktu terjadinya konsolidasi bisa mencapai ratusan tahun [11].

Secara umum menurut [2], penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar yaitu penurunan segera (*Immediate settlement*) merupakan penurunan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air dan penurunan konsolidasi (*Consolidation settlement*) merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.

Konsolidasi yang terjadi pada tanah lunak berlangsung dalam kurun waktu yang relatif lama. Perbandingan antara pemampatan tanah pada saat t dengan pemampatan total terjadi disebut juga sebagai derajat konsolidasi. Pemampatan pada lapisan tanah dasar yang terjadi karena keluarnya air pori ke lapisan yang lebih *porous* yaitu ke atas dan ke bawah saja (*single drainage*) atau ke atas dan ke bawah (*double drainage*) [11].

2. METODE PENELITIAN

Pengumpulan data

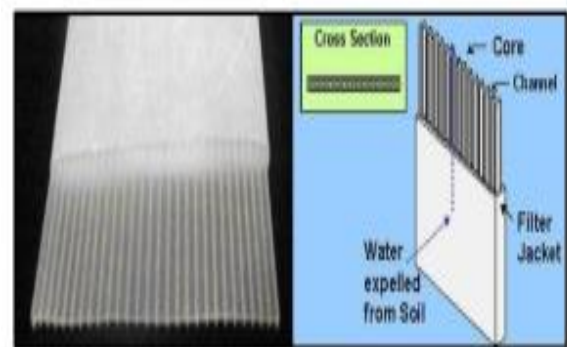
a. Data tanah dasar
Data yang digunakan adalah data sekunder, korelasi dan asumsi. Data sekunder didapat dari pengujian yang dilakukan di lapangan maupun di laboratorium. Untuk pengujian di lapangan, data yang diperoleh berupa N-SPT. Sedangkan untuk pengujian laboratorium, dilakukan pengujian *triaxial* untuk mendapatkan nilai sudut geser (Φ), pengujian kuat tekan bebas untuk mendapatkan nilai kuat tekan bebas (q_u), pengujian konsolidasi untuk mendapatkan nilai indeks kompresi (C_c) dan koefisien konsolidasi vertikal (C_v), serta pengujian berat volume untuk mendapatkan nilai berat

volume tanah (γ), dan nilai angka pori tanah (e).

b. Data tanah timbunan
Data tanah timbunan yang digunakan yaitu kepadatan kering maksimum (*Maximum Dry Density*- $\gamma_{dry\ maks}$), kadar air optimum (*Optimum Moisture Content* - w_{opt}), dan nilai berat jenis (*Spesific Gravity*- G_s).

Prefabricated vertical drain (PVD)

Prefabricated vertical drain adalah sistem drainase buatan yang diletakkan secara vertikal pada lapisan tanah lunak. Pada umumnya PVD adalah bahan sintesis cetakan untuk drainase. Bahan tersebut terdiri atas dua komponen, yaitu serat penyaring geotekstil (*geotextile filter fabric*) untuk membuat aliran air masuk dengan mudah ke dalam pori – pori tanah, kemudian plastik inti drainase (*plastic drain core*) yang berfungsi sebagai media pengumpul dan penyalur air. Pada umumnya PVD terbuat dari bahan yang memiliki ketahanan dari bahan-bahan penyusun tanah agar tetap stabil atau normal, seperti *polypropylene*, *polystyrene*, dan *polyester* [3].



Gambar 1. Bagian *Pefabricated Vertical Drain* (PVD) [16]

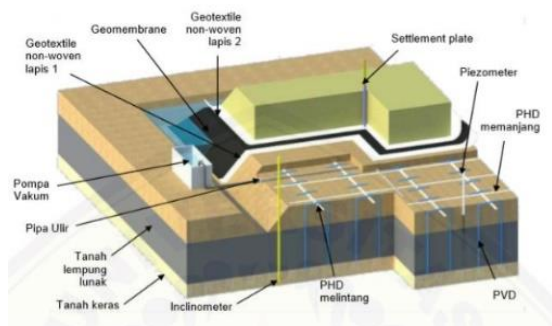
Proses konsolidasi pada PVD terjadi akibat pengaliran air pori secara dua arah yaitu horizontal dan vertikal sehingga pada penentuan besar penurunan menggunakan parameter derajat konsolidasi rata – rata (U) yang merupakan fungsi dari derajat konsolidasi vertikal (U_v) dan horizontal/radial (U_r). Besarnya penurunan

pada drain vertikal dipengaruhi oleh jarak antar drainase vertikal yang biasanya dipasang dengan pola segipat atau segitiga [12].

Vacuum consolidation method (VCM)

VCM merupakan penyempurnaan dari metode drainase vertikal *pre-fabricated vertical drain* (PVD) dimana pelaksanaannya dilakukan kombinasi PVD dan vakum (pompa) guna mempercepat dan meningkatkan penurunan (konsolidasi) serta meningkatkan tegangan geser pada tanah [13].

Pada metode *vacuum consolidation*, dilakukan perbaikan tanah dengan cara menghisap (*vacuum*) tanah dasar sesuai dengan beban kerja (*work load*) dan beban konstruksi (*construction load*) yang telah direncanakan. Waktu penghisapan dilakukan hingga konsolidasi tanah dasar mencapai derajat konsolidasi yang telah direncanakan. Apabila derajat konsolidasi tanah dasar telah tercapai maka penghisapan dihentikan dan konstruksi dimulai pelaksanaannya [13].



Gambar 2. Sistem *Vacuum Consolidation* [14]

Prinsipnya, metode *vacuum consolidation* terdiri dari sistem drainase vertikal yang diletakkan dari permukaan tanah ke dalam lapisan tanah sesuai dengan kedalaman yang dibutuhkan, sistem drainase permukaan termasuk media granular (tikar pasir) dan saluran horizontal, dan pipa kolektor yang diarahkan ke pompa vakum untuk tanah, serta pemakaian air dan udara

dari massa tanah yang diperbaiki. Massa tanah vakum tersebut diisolasi dari permukaan oleh membran kedap udara dan jika diperlukan akan dilindungi secara lateral dari kebocoran dengan dinding *cut-off* [3].

Data PVD

Data yang digunakan untuk PVD adalah berupa data material dari PVD, pola pemasangan PVD, jarak antar PVD, dan kedalaman pemasangan PVD.

Data tekanan vakum

Data tekanan *vacuum* yang diperoleh dengan menentukan tekanan atmosfer pada daerah yang akan dilakukan perbaikan tanah. Tekanan atmosfer tersebut dikonversi dengan nilai efektifitas pompa vakum yang diharapkan sehingga diperoleh beban yang digunakan pada analisa ini.

Rancangan penelitian

Analisa *vacuum consolidation* hanya dilakukan pada zona 2 (STA 2+422 – STA 2+662). Pemasangan PVD menggunakan pola pemasangan segitiga dengan variasi jarak 0,50 m; 0,75 m; dan 1,00 m. Efisiensi pompa vakum yang digunakan adalah sebesar 80%. Menurut SNI 8460:2017 faktor tahanan alir dan faktor gangguan tidak perlu diperhitungkan apabila panjang PVD tidak lebih dari 25 m. Dari data yang didapat kedalaman tanah lunak sebesar 8,7 m sehingga penelitian ini tidak memperhitungkan efek *smear zone* (daerah terganggu). Perhitungan penurunan sekunder tidak dilakukan.

3. METODE ANALISIS DATA

Penurunan konsolidasi (*Consolidation settlement*)

Berdasarkan [2] untuk menghitung penurunan konsolidasi primer (S_p) yang terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*), dapat menggunakan persamaan :

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_o + \Delta p}{p_o} \right) \quad (1)$$

dengan S_c = pemampatan akibat proses konsolidasi (m), C_c = indeks kompresi tanah, P_o = tegangan overburden efektif (t/m^2), e_o = angka pori, H = tebal lapisan tanah sub-lapisan (m), ΔP = penambahan tegangan vertikal (t/m^2).

Parameter perhitungan penurunan

Dalam menghitung besarnya penurunan suatu lapisan tanah, maka diperlukan parameter - parameter antara lain:

1. Tebal lapisan *compressible*

Tebal lapisan *compressible* yang diperhitungkan adalah yang memiliki nilai N- SPT < 10.

2. Tegangan *overburden* efektif (P_o)

Dalam [15], tegangan *overburden* efektif dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_o = \gamma \times \left(\frac{1}{2} \times H \right) \quad (2)$$

dengan γ = berat volume tanah efektif ($\gamma_{sat} - \gamma_w$) (t/m^3), H = tebal lapisan tanah yang terkonsolidasi (m).

3. Distribusi tegangan tanah (ΔP)

Dalam [15], distribusi tegangan tanah dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta P = 2 \times q_0 \times I \quad (3)$$

$$q_0 = \gamma_{\text{timbunan}} \cdot H \quad (4)$$

dengan ΔP = besar distribusi tegangan, q_0 = beban timbunan, γ_{timbunan} = berat volume timbunan (t/m^3), H = tinggi timbunan termasuk *preloading* (m), I = faktor pengaruh.

Faktor pengaruh dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = \frac{(a+b)}{b^2} (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} (\alpha_2) \quad (5)$$

dengan a = panjang horizontal kemiringan timbunan (m), b = lebar setengah timbunan (m),

$$\alpha_1 = \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{a+b}{z} \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{b}{z} \right\} \right] \text{ (radian),}$$

$$\alpha_2 = \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{b}{z} \right\} \right] \text{ (radian).}$$

Waktu pemampatan tanah dasar

Untuk konsolidasi arah vertikal, Casagrande (1938) dan Taylor (1948) mengusulkan persamaan hubungan U_v dan T_v sebagai berikut:

1. Untuk $U < 60\%$

$$T_v = \left(\frac{\pi}{4} \right) U_v^2 \quad (6)$$

2. Untuk $U > 60\%$

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log (100 - U_v\%) \quad (7)$$

dengan U_v = derajat konsolidasi, T_v = faktor waktu.

Menurut Terzaghi (1943) dalam [2], lamanya waktu penurunan konsolidasi dapat dihitung menggunakan rumus :

$$t = \frac{T_v \times Hdr^2}{C_v} \quad (8)$$

dengan t = waktu konsolidasi (detik), Hdr = panjang aliran air (m), T_v = faktor waktu, C_v = koefisien konsolidasi vertikal ($m^2/detik$).

Untuk tanah yang memiliki banyak lapis dengan ketebalan yang berbeda-beda, harga C_v gabungan dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$C_v \text{ gabungan} = \frac{(H_1+H_2+\dots+H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}} \right)^2} \quad (9)$$

dengan H_1 = tebal lapisan 1 (m), C_{v1} = Nilai C_v pada lapisan 1 ($m^2/detik$).

Prefabricated vertical drain (PVD)

Penyelesaian yang lebih teliti dalam perancangan PVD telah dilakukan dengan cara mengkombinasikan teori-teori asli Kjellman dan Barron (1948), seperti yang telah dilakukan oleh Hansbo (1979). Hasilnya untuk waktu konsolidasi dinyatakan oleh persamaan:

$$t = \frac{D^2}{8 C_h} F(n) \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right) \quad (10)$$

dengan t = waktu konsolidasi, D = diameter pengaruh drainase vertikal, C_h = koefisien konsolidasi arah horizontal, $F(n)$ = faktor hambatan akibat jarak antar PVD, U_h = derajat konsolidasi rata-rata arah horizontal.

Hubungan antara jarak drainase vertikal (S) dengan diameter pengaruh drainase (D) dapat dinyatakan dengan persamaan:

Pola segiempat:

$$D = 1,13 \times S \quad (11)$$

Pola segitiga:

$$D = 1,05 \times S \quad (12)$$

dengan D = diameter pengaruh drainase vertical, S = jarak drainase vertikal.

Diameter ekuivalen dari PVD didefinisikan sebagai diameter lingkaran drainase yang mempunyai kemampuan drainase yang sama dengan PVD. Keliling drainase vertikal bulat = keliling drainase empat persegi panjang, maka $\pi d_w = 2(a+b)$. Jadi, diameter ekuivalen:

$$d_w = \frac{2 \times (a+b)}{\pi} \quad (13)$$

dengan d_w = diameter ekuivalen PVD (cm), a = lebar tampang PVD (cm), b = tebal tampang PVD (cm).

Untuk F(n) dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$F(n) = \ln\left(\frac{D}{d_w}\right) - \frac{3}{4} \quad (14)$$

dengan, F(n) = faktor hambatan akibat jarak antar PVD, D = diameter pengaruh drainase vertikal, d_w = diameter ekuivalen PVD.

Faktor waktu konsolidasi dan derajat konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

Untuk arah vertikal:

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2} \quad (15)$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \times T_v}{\pi}}}{\left(1 + \left(4 \times \frac{T_v}{\pi}\right)^{2,8}\right)^{0,179}} \quad (16)$$

dengan T_v = faktor waktu pada sistem drainase vertikal, C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal, H_{dr} = panjang lintasan drainase.

Untuk arah horizontal:

$$T_h = \frac{C_h \times t}{D^2} \quad (17)$$

$$U_h = \left(1 - \exp\left(-\frac{8 \times T_h}{F}\right)\right) \quad (18)$$

dengan T_h = faktor waktu pada sistem drainase horizontal, C_h = Koefisien konsolidasi arah horizontal.

Untuk drainase kearah vertikal dan radial sekaligus, maka derajat konsolidasi rata-rata gabungan dinyatakan oleh persamaan:

$$U = (1 - (1 - U_v) \times (1 - U_h)) \times 100\% \quad (19)$$

dengan U_v = derajat konsolidasi rata-rata arah vertikal, U_h = derajat konsolidasi rata-rata arah horizontal, U = derajat konsolidasi rata-rata gabungan.

Koreksi tekanan atmosfer

Untuk menghitung efektivitas tekanan vakum, dilakukan koreksi tekanan atmosfer pada area lokasi dengan persamaan:

$$P_a(h) = 76 - \left(\frac{h}{100}\right) \text{ cmHg} \quad (20)$$

dengan P_a = Tekanan atmosfer (kPa), h = Ketinggian area (m).

4. HASIL

Data tanah dasar

Perbaikan tanah yang dilakukan pada area perpanjangan *runway* dikarenakan N-SPT tanah dasar permukaan ≤ 10 . Zona yang ditinjau adalah zona 2.

Tabel 1. Rekapitulasi Parameter Tanah Pada Zona 2

| Lap isa n | Dep th [m] | NSPT [-] | Cc | e _o | C _v [c m ² /se c] | Ko nsi ste nsi | H (m) |
|-----------------|------------------|-------------|--------------|----------------|---|-------------------------|----------|
| 1 | 0 - 2 | 7 | 0, 5 4 | 1,2 5 | 0,0 00 32 | Me diu m | 2 |
| 2 | 2 - 4 | 2 | 0, 5 4 | 1,2 5 | 0,0 00 67 | Ve ry Sof t | 2 |
| 3 | 4 - 7,5 | 6 - 8 | 0, 5 4 | 1,2 5 | 0,0 00 32 | Me diu m | 3,5 |

| Lap isa n | Dep th [m] | NSPT [-] | Cc | eo | Cv [c m ² /se c] | Ko nsi ste nsi | H (m) |
|-----------------|------------------|-------------|--------------|----------|---|-------------------------|----------|
| 4 | 7,5 - 13,5 | 8 - 18 | 0, 5 1 | 1,0 6 | 0,0 01 2 | Sti ff | 6 |
| 5 | 14 - 40 | 20 -56 | - | - | - | Ha rd | 26 |

Data tanah timbunan

Spesifikasi teknis dari material timbunan adalah sebagai berikut:

$\gamma_{sat} = 1,654 \text{ t/m}^3$
 $\gamma = 1,654 \text{ t/m}^3$
 $G_s = 2,67$

Tinggi tanah timbunan rata-rata yang digunakan adalah sebesar 1,6 m.

Pembebanan

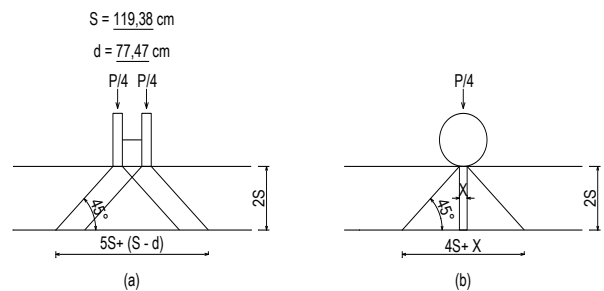
Beban yang diperhitungkan adalah beban pesawat, beban perkerasan, beban sand blanket dan beban tanah timbunan.

1. Beban Pesawat

Beban pesawat digunakan sebesar 12.450 N/m² yang diambil dari *maximum taxi weight* pesawat Boeing 737-900ER sebagai pesawat rencana dan *main gear pressure* (roda belakang) sebesar 15 kg/cm² (*Boeing Commercial Airplanes, 2013*).

Lebar roda = 16,5 inci = 41,91 cm
 Jarak antar roda = 30,5 inci = 77,49 cm
 $W = 85.366 \text{ kg}$

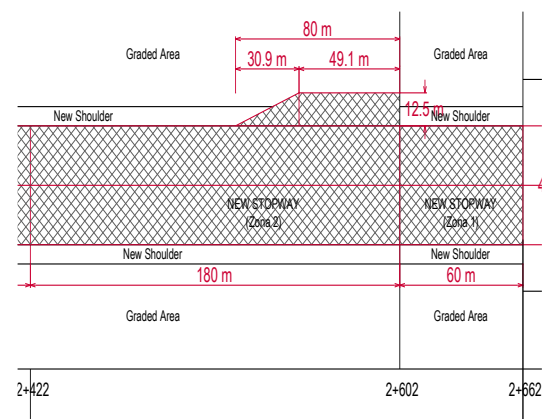
Ilustrasi distribusi beban pesawat modifikasi dari Basuki (1985) dalam [16], dapat dilihat pada gambar 3 (a. Ilustrasi Distribusi Beban Pesawat Tampak Depan ; b. Distribusi Beban Pesawat Tampak Samping.)



Gambar 3. Ilustrasi Beban Pesawat modifikasi dari Basuki (1985) [10]

2. Beban Perkerasan

Tampak Atas Runway dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Tampak Atas Runway

Tabel 2. Rekapitulasi Perhitungan Beban Perkerasan

| No. | Lapisan | H (m) | γ N/m ³ | q N/m ² | Keterangan |
|-------------|-------------|----------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) = (3) x (4) | (6) |
| 1 | Subbase | 0,16 | 20.000 | 3.200 | Crushed Aggregate Subbase |
| 2 | Base Course | 0,13 | 21.000 | 2.730 | Cement Treated Base Course |
| 3 | Laston | 0,06 | 22.000 | 1.320 | AC-BC |
| | Wearing | | | | AC-WC |
| 4 | Course | 0,05 | 22.000 | 1.100 | |
| Total Beban | | | | 8.350 | |

Pada tabel 2 merupakan rekapitulasi beban perkerasan beban perkerasan sebesar 8.350 N/m²

3. Beban Sand Blanket

Beban *sand blanket* digunakan sebesar 12.800 N/m², yang diperoleh dari:

Tebal *sand blanket* = 0,8 m dan $\gamma = 16.000$ N/m³

$$q_{\text{sand blanket}} = 0,8 \times 16.000 = 12.800 \text{ N/m}^2$$

4. Beban Tanah Timbun

Untuk membersihkan area perpanjangan *runway* dari rumput-rumput liar dan akar-akar pepohonan maka dilakukan *stripping* setebal 0,3 m. Rekapitulasi perhitungan beban tanah timbun dan rekapitulasi analisis beban rencana dapat dilihat pada tabel 3 dan tabel 4.

Tabel 3. Analisis Beban Tanah Timbun

| Tebal Timbunan Akibat Elevasi | Tebal Timbunan Akibat Stripping | Total Timbunan | γ_{timbun} | P_{timbunan} |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| (m) | (m) | M | (N/m ³) | (N/m ²) |
| (1) | (2) | (3) = (1) + (2) | (4) | (5) = (3) × (4) |
| 1,6 | 0,3 | 1,9 | 16.540 | 31.426 |

Tabel 4. Rekapitulasi Analisis Beban Rencana

| No. | Deskripsi | Satuan | Nilai |
|-----|--------------------|------------------|--------|
| 1 | Beban Pesawat | N/m ² | 12.452 |
| 2 | Beban Perkerasan | N/m ² | 8.350 |
| 3 | Beban Sand Blanket | N/m ² | 12.800 |

| No. | Deskripsi | Satuan | Nilai |
|-------------|------------------------|------------------|--------|
| 4 | Beban Timbunan Elevasi | N/m ² | 31.426 |
| Total Beban | | N/m ² | 65.028 |

Data prefabricated vertical drain (PVD)

Digunakan PVD dengan ukuran sebagai berikut:

1. Lebar PVD (a) = 10 cm
2. Tebal PVD (b) = 0,5 cm

Data tekanan vacuum

Efektivitas pompa *vacuum* yang digunakan adalah sebesar 80% dengan ketinggian Kota Jambi rata-rata dari muka air laut sebesar 60 m.

Analisis penurunan konsolidasi tanah asli

Perhitungan penurunan konsolidasi tanah asli menggunakan teori konsolidasi satu dimensi oleh Terzaghi (1943) dalam [2]. Perhitungannya terdiri dari:

1. Tegangan *overburden* efektif (P_o)

Tegangan *overburden* efektif merupakan tegangan awal akibat beban lapisan tanah itu sendiri. Hasil rekap tegangan *overburden* efektif pada tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Tegangan *Overburden* Efektif

| Lapisan | γ_{sat} N/m ³ | γ' N/m ³ | H m | P_o N/m ² |
|-----------|---|-------------------------------|--------|---------------------------|
| Lapisan 1 | 17000 | 7000 | 1,0 | 3.500 |
| Lapisan 2 | 16000 | 6000 | 2,0 | 9.500 |
| Lapisan 3 | 17000 | 7000 | 3,5 | 21.750 |
| Lapisan 4 | 19000 | 9000 | 1,2 | 27.150 |

Pada tabel 5 diperoleh tegangan *overburden* efektif setiap lapisan tanah.

Lapisan tanah dapat dilihat pada gambar 5.

| | | |
|---------|-------------|------------------|
| Lapis 1 | Clay Medium | +0.0 m -1.0 m |
| Lapis 2 | Clay Soft | -2.0 m -4.0 m |
| Lapis 3 | Clay Medium | -7.5 m -8.7 m |
| Lapis 4 | Clay Stiff | |

Gambar 5. Tebal dan Jenis Lapisan Tanah

2. Tegangan akibat beban timbunan (Δp)

Pengaruh penambahan tegangan akibat beban timbunan dihitung pada tiap lapisan yang berbeda, yaitu pada kedalaman 1,0 m; 3,0 m; 6,5 dan 7,7 m di bawah muka air tanah. Rekap perhitungan tegangan beban timbunan ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi Perhitungan Tegangan Akibat Beban Timbunan (Δp)

| Lapisan | I | q_0 N/m ² | Δp N/m ² |
|-----------|------|---------------------------|--------------------------------|
| Lapisan 1 | 1,57 | 47.926 | 47.913,947 |
| Lapisan 2 | 1,57 | 47.926 | 47.834,319 |
| Lapisan 3 | 1,56 | 47.926 | 47.492,059 |
| Lapisan 4 | 1,57 | 47.926 | 47.905,330 |

3. Besar penurunan (S_c)

Dihitung besar penurunan pada setiap lapisan tanah dikarenakan tiap lapisan tanah memiliki karakteristik tanah yang berbeda, yaitu pada kedalaman 1,0 m; 2,0 m; 3,5 dan 1,2 m di bawah muka air tanah. Hasil rekapitulasi perhitungan besar penurunan ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7. Hasil Rekapitulasi Perhitungan Besar Penurunan

| Lapisan | H (m) | Po (N/m ²) | ΔP (N/m ²) | Cc | e _o | S _c (m) |
|-----------|-------|------------------------|--------------------------------|------|----------------|--------------------|
| Lapisan 1 | 1,0 | 3.50 | 47.913,947 | 0,54 | 1,25 | 0,28 |
| Lapisan 2 | 2,0 | 9.50 | 47.834,319 | 0,54 | 1,25 | 0,37 |
| Lapisan 3 | 3,5 | 21.75 | 47.492,059 | 0,54 | 1,25 | 0,42 |
| Lapisan 4 | 1,2 | 27.15 | 47.905,330 | 0,51 | 1,06 | 0,13 |
| Σ | | | | | | 1,208 |

Pada tabel 7 diperoleh besar penurunan (S_c) pada masing-masing lapisan tanah. Sehingga didapatkan total besar penurunan tanah akibat beban timbunan adalah sebesar 1,208 m.

4. Waktu Penurunan (t)

Setelah diperoleh besar penurunan yang terjadi dilakukan perhitungan waktu penurunan. Dikarenakan tiap lapisan memiliki nilai koefisien konsolidasi (C_v) yang berbeda, maka nilai C_v yang digunakan ialah nilai C_v gabungan. Untuk derajat konsolidasinya ialah 90 % dengan faktor waktu 0,848.

Dari hasil perhitungan penurunan dan waktu penurunan tanah asli, tanah akan terus mengalami penurunan hingga 35,469 tahun, sampai titik dimana tanah tersebut mencapai konsolidasi 90%. Dapat dinyatakan bahwa tanah pada area perpanjangan *runway* yang akan dibangun memerlukan perbaikan tanah agar konsolidasi tanah dapat dipercepat. Metode perbaikan tanah yang akan digunakan adalah *vacuum consolidation*.

Perhitungan perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation*

Perhitungan perbaikan tanah dengan metode *Vacuum Consolidation* hampir sama

dengan perhitungan konsolidasi tanah asli, yang membedakan ialah adanya penambahan beban awal berupa tekanan vakum sebagai penambahan beban rencana. Perhitungan penurunan konsolidasi dengan metode *vacuum consolidation* juga menggunakan teori konsolidasi satu dimensi. Perhitungannya terdiri dari:

1. Perhitungan tegangan *overburden* efektif (P_o)

Hasil perhitungan tegangan *overburden* efektif ditambah dengan tekanan vakum, tetapi perhitungannya tidak berpengaruh sama sekali dengan penambahan tekanan vakum. Hasil rekapitulasi perhitungan tegangan *overburden* efektif pada *vacuum consolidation* ditunjukkan pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil Rekapitulasi Perhitungan Tegangan *Overburden* Efektif Pada *Vacuum Consolidation*

| Lapisan | γ_{sat} N/m ³ | γ' N/m ³ | H m | P_o N/m ² |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------|--------|---------------------------|
| Lapisan 1 | 17000 | 7000 | 1,00 | 3.500 |
| Lapisan 2 | 16000 | 6000 | 2,00 | 9.500 |
| Lapisan 3 | 17000 | 7000 | 3,50 | 21.750 |
| Lapisan 4 | 19000 | 9000 | 1,20 | 27.150 |

2. Perhitungan tegangan akibat beban timbunan dan tekanan vakum (Δp)

Pengaruh penambahan tegangan akibat beban timbunan dihitung di tiap lapisan yang berbeda, yaitu pada kedalaman 1,0 m; 2,0 m; 3,5 dan 1,2 m di bawah muka air tanah. Perhitungan akibat beban timbunan dan tekanan vakum dilakukan dengan adanya penambahan beban sebesar 141.126,211 N/m² hasil penambahan dari beban vakum, beban *sand blanket*, beban timbunan dan beban tanah asli.

Tabel 9. Hasil Rekapitulasi Perhitungan Tegangan Akibat Beban Timbunan dan Tekanan Vakum (Δp) pada *Vacuum Consolidation*

| Lapisan | I | q_o N/m ² | Δp N/m ² |
|-----------|----------|---------------------------|--------------------------------|
| Lapisan 1 | 1,5 7 | 141.126,21 1 | 141.090,71 8 |
| Lapisan 2 | 1,5 7 | 141.126,21 1 | 140.856,23 9 |
| Lapisan 3 | 1,5 6 | 141.126,21 1 | 139.848,39 7 |
| Lapisan 4 | 1,5 7 | 141.126,21 1 | 141.065,34 4 |

Pada tabel 9. didapatkan hasil tegangan akibat beban timbunan dan tekanan vakum (Δp) disetiap lapisan tanah.

3. Perhitungan Besar Penurunan (S_c)

Hasil rekap perhitungan besar penurunan yang ditambah beban vakum ditunjukkan pada tabel 10.

Tabel 10. Hasil Rekap Perhitungan Besar Penurunan pada *Vacuum Consolidation*

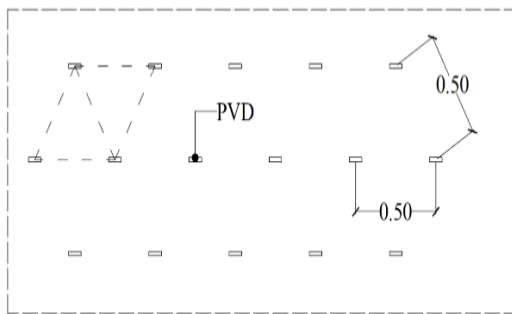
| Lapisan n | H (m) | P_o (N/m ²) | ΔP (N/m ²) | Cc | e_o | S_c (m) |
|--------------|----------|------------------------------|-----------------------------------|----------|----------|--------------|
| Lapisan 1 | 1,00 | 3.500,0 0 | 141.090 ,72 | 0,5 4 | 1,2 5 | 0,39 |
| Lapisan 2 | 2,00 | 9.500,0 0 | 140.856 ,24 | 0,5 4 | 1,2 5 | 0,58 |
| Lapisan 3 | 3,50 | 21.750,0 00 | 139.848 ,40 | 0,5 4 | 1,2 5 | 0,73 |
| Lapisan 4 | 1,20 | 27.150,00 | 141.065 ,34 | 0,5 1 | 1,0 6 | 0,24 |
| Σ | | | | | | 1,9 31 |

Dari tabel 10. didapatkan besar penurunan (S_c) pada setiap lapisan tanah akibat tekanan vakum dan beban timbunan. Sehingga didapatkan peningkatan besar penurunan tanah

akibat beban timbunan dan tekanan vakum adalah sebesar 1,931 m.

4. Perhitungan penurunan konsolidasi pada *vacuum consolidation*

Perhitungan penurunan konsolidasi pada perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation* digunakan analisa menggunakan PVD dengan pola pemasangan PVD dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Pola Pemasangan PVD Pola Segitiga Dengan Jarak (s) = 0,5 m

Perhitungan penurunan konsolidasi dengan *vacuum consolidation* akan dihitung menggunakan PVD pola segitiga jarak antar titik PVD yaitu 0,5 m, 0,75 m, dan 1,0 m dengan kedalaman PVD 8,7 m.

Rekapitulasi perhitungan VCM dengan variasi pemasangan jarak sebesar 0,5 m dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 11. Rekapitulasi Perhitungan VCM Pada Jarak Pemasangan, S=0,50 m

| t (tahun) | t (hari) | Uv (%) | 1-Uv | Th | Uh (%) | 1-Uh | U (%) | Sc (m) |
|-----------|----------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 0,00 | 0 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,027 | 10 | 0,026 | 0,974 | 28,21 | 82,17 | 17,83 | 8,53 | 9 |
| 0,055 | 20 | 0,036 | 0,964 | 56,44 | 96,48 | 3,52 | 8 | 8 |

| t (tahun) | t (hari) | Uv (%) | 1-Uv | Th | Uh (%) | 1-Uh | U (%) | Sc (m) |
|-----------|----------|--------|-------|-------|--------|------|-------|--------|
| 0,082 | 30 | 0,044 | 0,956 | 84,55 | 99,44 | 0,56 | 9,92 | 2 |

Pada tabel 11 dapat dilihat bahwa pada jarak pemasangan sebesar 0,5 m diperoleh derajat konsolidasi sudah melebihi 90% saat t sebesar 20 hari dengan penurunan sebesar 1,87 m. Untuk mendapatkan nilai derajat konsolidasi 90%, diperlukan perhitungan dengan cara interpolasi.

Rekapitulasi perhitungan VCM dengan variasi pemasangan jarak sebesar 0,75 m, dapat dilihat pada tabel 12.

Tabel 12 Hasil Rekap Perhitungan VCM Pada Jarak Pemasangan, S=0,75 m

| t (tahun) | t (hari) | Uv (%) | 1-Uv | Th | Uh (%) | 1-Uh | U (%) | Sc (m) |
|-----------|----------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 0,00 | 0 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,03 | 10 | 0,026 | 0,974 | 12,52 | 44,28 | 55,72 | 4,68 | 8 |
| 0,05 | 20 | 0,036 | 0,964 | 25,04 | 68,09 | 31,91 | 7,05 | 5 |
| 0,08 | 30 | 0,044 | 0,956 | 37,06 | 82,16 | 17,84 | 8,31 | 1 |
| 0,11 | 40 | 0,051 | 0,949 | 50,01 | 90,37 | 9,63 | 7,15 | 5 |
| 0,14 | 50 | 0,057 | 0,943 | 62,02 | 94,66 | 5,34 | 5,33 | 3 |
| 0,16 | 60 | 0,063 | 0,937 | 75,03 | 97,10 | 2,90 | 7,88 | 8 |
| 0,19 | 70 | 0,068 | 0,932 | 87,04 | 98,37 | 1,63 | 8,00 | 0 |

| <i>t</i> (<i>ta</i> <i>hun</i>) | <i>t</i> (<i>h</i> <i>ari</i>) | <i>Uv</i> (%) | <i>1-Uv</i> | <i>Th</i> | <i>Uh</i> (%) | <i>1-Uh</i> | <i>U</i> (%) | <i>Sc</i> (m) |
|--|---|----------------------|-------------|-----------|----------------------|-------------|---------------------|----------------------|
| 0,2 2 | 80 | 0,07 2 | 0,92 8 | 1,00 2 | 0,99 1 | 0,00 9 | 0,09 9 | 1,09 1 |

Pada tabel 12 dapat dilihat bahwa pada jarak pemasangan sebesar 0,75 m diperoleh derajat konsolidasi sudah melebihi 90% saat t sebesar 40 hari dengan penurunan sebesar 1,75 m. Untuk mendapatkan nilai derajat konsolidasi 90%, diperlukan perhitungan dengan cara interpolasi.

Rekapitulasi perhitungan VCM dengan variasi pemasangan jarak sebesar 1,00 m, dapat dilihat pada tabel 4.13.

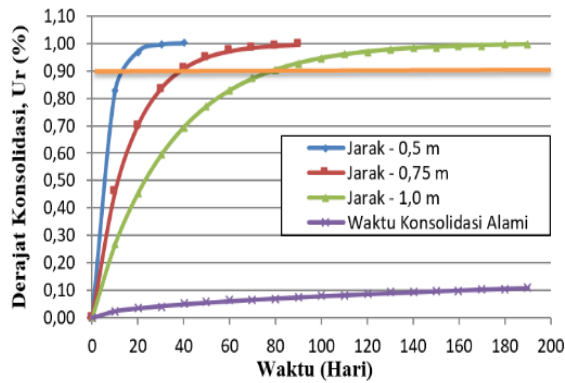
Tabel 13. Hasil Rekap Perhitungan VCM Pada Jarak Pemasangan, S=1,00 m

| <i>t</i> (<i>ta</i> <i>hun</i> <i>n</i>) | <i>t</i> (<i>h</i> <i>ari</i> <i>i</i>) | <i>U</i> <i>v</i> (%) | <i>1-U</i> <i>v</i> | <i>T</i> <i>h</i> | <i>U</i> <i>h</i> (%) | <i>1-U</i> <i>h</i> | <i>U</i> (%) | <i>S</i> <i>c</i> (m) |
|---|--|---------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,0 0 | 0 | 0,00 0 | 1,00 0 | 0,00 0 | 0,00 0 | 1,00 0 | 0,00 0 | 0,00 0 |
| 0,0 3 | 10 | 0,02 6 | 0,97 4 | 0,07 0 | 0,24 5 | 0,75 5 | 0,2 6 | 0,5 1 |
| 0,0 5 | 20 | 0,03 6 | 0,96 4 | 0,14 1 | 0,43 0 | 0,57 0 | 0,4 5 | 0,8 7 |
| 0,0 8 | 30 | 0,04 4 | 0,95 6 | 0,21 1 | 0,57 0 | 0,43 0 | 0,5 9 | 1,1 4 |
| 0,1 1 | 40 | 0,05 1 | 0,94 9 | 0,28 2 | 0,67 5 | 0,32 5 | 0,6 9 | 1,3 4 |
| 0,1 4 | 50 | 0,05 7 | 0,94 3 | 0,35 2 | 0,75 5 | 0,24 5 | 0,7 7 | 1,4 8 |
| 0,1 6 | 60 | 0,06 3 | 0,93 7 | 0,42 3 | 0,81 5 | 0,18 5 | 0,8 3 | 1,6 0 |

| <i>t</i> (<i>ta</i> <i>hun</i> <i>n</i>) | <i>t</i> (<i>h</i> <i>ari</i> <i>i</i>) | <i>U</i> <i>v</i> (%) | <i>1-U</i> <i>v</i> | <i>T</i> <i>h</i> | <i>U</i> <i>h</i> (%) | <i>1-U</i> <i>h</i> | <i>U</i> (%) | <i>S</i> <i>c</i> (m) |
|---|--|---------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,1 9 | 70 | 0,06 8 | 0,93 2 | 0,49 3 | 0,86 0 | 0,14 0 | 0,8 7 | 1,6 8 |
| 0,2 2 | 80 | 0,07 2 | 0,92 8 | 0,56 4 | 0,89 5 | 0,10 5 | 0,9 0 | 1,7 4 |
| 0,2 5 | 90 | 0,07 7 | 0,92 3 | 0,63 4 | 0,92 0 | 0,08 0 | 0,9 3 | 1,7 9 |
| 0,2 7 | 100 | 0,08 1 | 0,91 9 | 0,70 5 | 0,94 0 | 0,06 0 | 0,9 4 | 1,8 2 |
| 0,3 0 | 110 | 0,08 5 | 0,91 5 | 0,77 5 | 0,95 5 | 0,04 5 | 0,9 6 | 1,8 5 |
| 0,3 3 | 120 | 0,08 9 | 0,91 1 | 0,84 5 | 0,96 6 | 0,03 4 | 0,9 7 | 1,8 7 |
| 0,3 6 | 130 | 0,09 2 | 0,90 8 | 0,91 6 | 0,97 4 | 0,02 6 | 0,9 8 | 1,8 9 |
| 0,3 8 | 140 | 0,09 6 | 0,90 4 | 0,98 6 | 0,98 0 | 0,02 0 | 0,9 8 | 1,9 0 |
| 0,4 1 | 150 | 0,09 9 | 0,90 1 | 1,05 7 | 0,98 5 | 0,01 5 | 0,9 9 | 1,9 0 |

Pada tabel 13 dapat dilihat bahwa pada jarak pemasangan sebesar 1,00 m diperoleh derajat konsolidasi sudah melebihi 90% saat t sebesar 80 hari dengan penurunan sebesar 1,74 m.

Berdasarkan hasil pada tabel 11, 12, dan 13, dapat disajikan dalam bentuk perbandingan waktu dengan derajat konsolidasi pada jarak pemasangan 0,5 m; 0,75 m dan 1,0 m pada gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan Hubungan Waktu Konsolidasi *Vacuum Consolidation* dengan Waktu Konsolidasi Alami

Dari gambar 7 dapat dilihat bahwa dengan menggunakan metode *vacuum consolidation* dengan variasi jarak pemasangan PVD 0,5 m, 0,75 m dan 1,0 m tanah mencapai derajat konsolidasi 90% dengan waktu yang cepat dibandingkan dengan konsolidasi tanah yang terjadi secara alami.

Hasil interpolasi untuk mendapatkan waktu konsolidasi (t) dan penurunan konsolidasi (Sc) pada saat derajat konsolidasi 90% dapat dilihat pada tabel 14.

Tabel 14. Rekapitulasi Perhitungan Perbaikan Tanah dengan *Vacuum Consolidation* Pada Derajat Konsolidasi 90%

| Jarak Pemasangan PVD | Tanpa Efek Smear | |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | Waktu Konsolidasi (t) (hari) | Penurunan Konsolidasi (Sc) (m) |
| s = 0,50 m | 15 | 1,737 |
| s = 0,75 m | 48 | 1,737 |
| s = 1,00 m | 80 | 1,744 |

Setelah dilakukan analisis *vacuum consolidation* dengan variasi jarak pemasangan PVD 0,50 m; 0,75 m; 1,00 m. Didapatkan waktu konsolidasi yang paling cepat (mencapai konsolidasi 90%) pada variasi jarak 0,50 m dengan waktu 15 hari. Besar penurunan yang terjadi pada tiap

variasi relatif sama yaitu sebesar 1,737 m.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh [1], perbaikan tanah menggunakan metode *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan jarak pemasangan PVD 0,5 m dengan pola segitiga menghasilkan waktu penurunan tanah yang lebih cepat. Penurunan yang terjadi sebesar 3,8 m dengan waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90% adalah selama kurang lebih 2 bulan.

Dengan mengurangi jarak pemasangan PVD dan penambahan beban vakum, akan menambah besar penurunan dan waktu konsolidasi yang terjadi akan semakin cepat.

5. KESIMPULAN

Dari perbaikan tanah menggunakan metode *vacuum consolidation* dengan variasi jarak pemasangan dapat disimpulkan bahwa jarak pemasangan PVD sebesar 0,50 m menghasilkan waktu untuk mencapai derajat konsolidasi 90% yang lebih cepat yaitu selama 15 hari dan besar penurunan yang terjadi pada setiap variasi jarak pemasangan relatif sama yaitu sebesar 1,737 m.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aspar, W. A. N. and Fitriani, E. N. (2016). "Pengaruh Jarak dan Pola Prefabricated Vertical Drain (PVD) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak". Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, Vol. 10, 41–50.
- [2] Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah Rekayasa (Prinsip - prinsip Rekayasa Geoteknis)* jilid I. Erlangga, Surabaya.
- [3] Fadhillah, H. M. (2018). "Perencanaan Perbaikan Tanah Lunak Pada Pembangunan Cluster D Kawasan Kota Summarecon Bandung Menggunakan Kombinasi Metode *Vacuum Consolidation* Dengan *Prefabricated Vertical Drain*". Skripsi, Universitas Brawijaya, Malang.
- [4] Ferdian, F. Jefri, M. and Iswan. (2015).

- "Pengaruh Penambahan Pasir Terhadap Tingkat Kepadatan dan Daya Dukung Tanah Lempung Lunak Organik". *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, Vol. 3, 145-156.
- [5] Hardiyatmo, H. C. (2014). *Mekanika Tanah 2*, Edisi-V. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- [6] Irfan, D. Yusa, M. and Fatnanta, F. (2021). "Pengaruh Efek Smear Terhadap Pola Pemasangan dan Jarak Pemasangan Pada Perbaikan Tanah Dengan *Prefabricated Vertical Drain* (Studi Kasus : Proyek Perpanjangan *Runway* Sultan Thaha Syaifuddin, Provinsi Jambi)". *Jurnal Teknik*, Vol. 15, 35-42.
- [7] Kuswanda, W. P. (2015). "Problematika Pembangunan Infrastruktur Pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya". *Prosiding Semnas Teknik Sipil Universitas Lampung Pembangunan Berkelanjutan di Lahan Basah*, Surabaya, 16-17 Oktober 2015, 270-288.
- [8] Malik, A. and Ardan, M. (2019). "Analisa *Runway* Di Bandara Senubung Gayo Lues Aceh". *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation*, Vol. 3, 11-18.
- [9] Noviani, S. (2011). "Perencanaan Penambahan *Runway* Di Bandara Untuk 10 Tahun Ke Depan dengan Metode *Support Vector Regression*". Skripsi, Universitas Indonesia, Depok.
- [10] Okpatiasari, P. Tiara, L. Wardanai, S. P. R. and Hardiyati, S. (2018). "Analisis Goteknik Pada *Taxiway* di Proyek Pengembangan Bandara Ahmad Yani Semarang". *Jurnal Karya Teknik Sipil*, Vol. 7, 121-130.
- [11] Oktavian, E. P. (2019). "Perencanaan Perbaikan Tanah Pada Pembangunan Jalan Tol Pematang Panggang – Kayu Agung, Sumatera Selatan Dengan Metode *Preloading* Kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* dan *Prefabricated Horizontal Drain*". Skripsi, Universitas Jember, Jember.
- [12] Puspita, N. and Capri, A. (2017). "Analisa Penurunan Tanah Lunak Dengan Beberapa Metode Konsolidasi Pada Proyek Jalan Tol Palindra". *Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, Vol. 6, 17-24.
- [13] Puspita, N. and Saggaf, A. (2018). "Pengaruh VCM (Vacuum Consolidation Method) Pada Tanah Gambut : *Review*". *Seminar Nasional AVoER X*, Palembang, 31 Oktober 2018, 209-216.
- [14] Wardana, A. B. (2019). "Evaluasi Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode Observasional (Studi Kasus Metode *Vacuum Consolidation System* Di Pembangunan Jalan Tol Pematang Panggang – Kayu Agung, Sumatera Selatan)". Skripsi, Universitas Jember, Jember.
- [15] Winner, D. (2017). "Perbaikan Tanah Dasar Menggunakan *Pre-Fabricated Vertical Drain* dengan Variasi Kedalaman dan Perkuatan Lereng dengan Turap Studi Kasus : Lapangan Penumpukan Peti Kemas, Pelabuhan Trisakti, Banjarmasin, Kalimantan Selatan". Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [16] Zhafirah, A. and Amalia, D. "Perencanaan *Preloading* Dengan Penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang". *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*. Vol. 21, 10-18

